Erfindungsbeschreibung

Maßnahme gegen dielektrische Aufladung
(Countermeasure Against Dielectric Charging)

Kurzfassung:

Die Erfindung betrifft Maßnahmen zur Verhinderung der dielektrischen Aufladung in elektrostatischen MEMS-Systemen, um eine stabile Langzeitfunktion zu gewährleisten. Vorgeschlagen werden zwei Ansteuerungsschemata, die Signale nahe 0 V verwenden und Phasenverschiebungen zwischen festen Elektroden und dem beweglichen Element erzeugen, sodass virtuelle Spannungsquellen vermieden werden. Erstes Schema: zwei feste Elektroden werden mit Sinusspannungen angesteuert, die ca. 90° phasenverschoben sind, während das bewegliche Element geerdet ist; dies erzeugt überwiegend eine laterale Bewegung in Richtung der ersten Elektrode. Zweites Schema: alle drei Elektroden erhalten um 0 V schwingende Signale mit typischer Phasenverschiebung von 80–100° (bevorzugt 89–91°); die Gesamtkräfte sind balanciert und reduzieren Gleichspannungen. Anwendungen umfassen MEMS-Sensoren, Mikrospiegel und Mikroaktoren; Vorteile sind geringere Drift, bessere Langzeitstabilität und größere Einsatzflexibilität.

Keywords: dielektrische Aufladung, MEMS, elektrostatische Ansteuerung, Phasenverschiebung, Spannungsbalancierung

Abstract:

The present invention provides measures to prevent dielectric charging in electrostatic MEMS systems to ensure stable long-term operation. It proposes two drive schemes that use near-zero voltages and phase-shifted signals between electrodes to avoid virtual voltage sources. In Scheme 1, two fixed electrodes are driven with sinusoidal signals approximately 90° out of phase while the movable element is grounded, yielding predominantly lateral motion toward the first electrode. Scheme 2 drives all three electrodes with around-0 V alternating signals, with phase shifts typically in the 80–100° range (preferably 89–91°); the resulting forces are balanced, minimizing DC components. Applications include MEMS sensors, micro-mirrors, and micro-actuators; advantages are reduced drift, improved long-term stability, and greater deployment flexibility.

Keywords: dielectric charging prevention, MEMS, electrostatic actuation, phase shift, voltage balancing

1 Erfindende und Autoren

Michael Stolz

Bert Kaiser

Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS), Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden

2 Technisches Gebiet

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein elektrostatisches System, insbesondere ein mikroelektromechanisches System (MEMS) mit schichtweisem Aufbau. Dabei weist die obere und die untere Schicht festsitzende Elektroden auf, die gegenüber einer mittleren Schicht mit beweglichen Elementen durch einen Spalt beabstandet sind. Durch Anlegen einer Spannung wird zwischen den Elektroden und den beweglichen Elementen ein elektrostatisches Feld aufgebaut, welches wiederum zu beiderseitigen Kräften und folglich zu einer (mehrachsigen) Bewegung der beweglichen Elemente führt. Besonders bevorzugt ist die (reine) laterale Bewegung der beweglichen Elemente. Mit anderen Worten eine Bewegung der beweglichen Elemente parallel zur Ausdehnung der Schichten des MEMS ist bevorzugt.

Durch technologisch bedingte Schritte oder durch Anlegen einer elektrischen Spannung mit konstantem DC-Anteil zwischen den beweglichen und festsitzenden Elektroden kann es zur dielektrischen Aufladung von Elektroden kommen, besonders wenn sie in einer elektrisch isolierenden Schicht verkapselt sind. Das führt zum Aufbau einer virtuellen Spannungsquelle, die entgegen der Anregungsspannung arbeitet, was zu einem Auslenkungsverlust der beweglichen Elemente über die Zeit führt. Um den Auslenkungsverlust entgegenzuwirken, muss diese virtuelle Spannungsquelle je nach Entstehungsursache verhindert bzw. abgebaut werden.

3 Stand der Technik/ Charakteristik der bisherigen bekannten Lösungen

Die EP3201123A1 beschreibt eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Reduzierung von dielektrischer Aufladung in MEMS-Systemen. Das System umfasst eine feste Aktuator-Elektrode auf einem Substrat und eine (in Richtung fester) bewegliche Aktuator-Elektrode über dem Substrat. Zwischen den Elektroden sind Isolationserhöhungen angeordnet, um einen Kontakt der Elektroden zu verhindern und in Nähe der Erhöhungen befindet sich ein Isolationselement, dass ein elektrisches Feld in der Erhöhung verhindert.

Die **WO2022117197A1** beschreibt ein MEMS-Bauelement mit einem beweglichen Element, das zwischen zwei Schichtstapel angeordnet ist. Das Bauelement umfasst Antriebsstrukturen, die eine Kraft erzeugen um das bewegliche Element auszulenken. Nachteilig wird keine dielektrische Aufladung verhindert. Die Signalspannungen an den Elektroden können denselben Betrag aufweisen, oder um beispielsweise um 180°-Phasen verschoben sein. Die Phasenverschiebung kann auch andere Werte annehmen.

Die **JP2012109772 A2** beschreibt ein MEMS-Resonator mit mind. drei Elektroden. Die um 180 Grad phasenverschobene AC-Signale werden in zwei der der mind. drei Elektroden ein- oder ausgegeben. Nachteilig wird keine dielektrische Aufladung verhindert.

4 Darlegung der Erfindung

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, die dielektrische Aufladung der beweglichen Elemente eines elektrostatischen Systems zu verhindern. Dadurch wird eine gleichbleibende Funktionsweise der Anwendung über einen längeren Zeitraum ermöglicht bzw. ein Auslenkungsverlust der beweglichen Elemente verhindert.

Die Aufgabe kann durch ein System einer Steuervorrichtung gelöst werden, die ausgebildet ist, Aktoren und Statoren eines elektrostatischen Systems mit spezifischen Spannungen anzusteuern und damit mehrere Ansteuerungsschemata bereitstellt.

Zur Verhinderung einer dielektrischen Aufladung dürfen im Betrieb nur Spannungen gleich 0V bzw. um die 0V alternierenden Spannungen vorkommen, womit die Einzelelemente gleichzeitig geladen und entladen werden. Dabei müssen die Spannungen zwischen den festen Elektroden und dem beweglichen Element phasenverschoben zueinander sein, um die Auslenkung des beweglichen Elementes in verschiedene Richtungen zu ermöglichen.

Beim ersten Ansteuerungsschema wird zwischen einer ersten festen Elektrode und dem geerdeten beweglichen Element z.B. eine um die 0V schwingende Sinusspannung angelegt. Die Potenzialdifferenz zwischen erster und zweiter fester Elektrode entspricht einer um die 0V schwingenden und einer phasenverschobenen Sinusspannung (Fig.1). Die Phasenverschiebung ist dabei bevorzugt zeitlich veränderlich oder zeitlich zwischen 10 und 170°, bevorzugt zwischen 80 und 100° und besonders bevorzugt zwischen 89° und 91°. Da die elektrostatische Kraft von dem Spannungsquadrat abhängig ist, entsteht eine dem Sinusquadrat proportionale bevorzugt laterale Bewegung in Richtung der ersten festsitzenden Elektrode. Die Bewegung in Richtung der zweiten Elektrode wird entsprechend phasenversetzt und ist dem Cosinusquadrat proportional. Da die beiden phasenverschobenen

und entgegengesetzten Kräfte gleichzeitig auf die beweglichen Elemente wirken, bleiben die Elemente in einem balancierten Betrieb und erfahren dabei eine superponierte Wirkung von $\sin(x)^2 - \cos(x)^2 = -\cos(2x)$ (Fig.2). Handelt es sich bei dem beweglichen Element um ein lineares Feder-Masse-System, wird die Auslenkung auch einer harmonischen $\cos(2x)$-Funktion folgen. Wird die Auslenkung mit einfacher Frequenz benötigt, soll die Bewegung mit der halben Frequenz ($x/2$) angeregt werden.

Beim zweiten Ansteuerungsschema werden alle 3 Elektroden mit einer alternierenden um 0V schwingenden und mit phasenverschobener Spannung angesteuert. Die Phasenverschiebung ist dabei bevorzugt zeitlich veränderlich oder zeitlich unveränderlich zwischen 10 und 170°, bevorzugt zwischen 80 und 100° und besonders bevorzugt zwischen 89° und 91° und Entsprechende. Somit wirkt auf das bewegliche Element folgende Gesamtkraft:
$(\sin(x + \varphi_1) - \sin(x + \varphi_2))^2 - (\sin(x + \varphi_3) - \sin(x + \varphi_2))^2$.
Eine durch elektrische Aufladung nicht reduzierte Anregung kann z.B. mit folgenden Phasen an den Elektroden und dem beweglichen Element realisiert werden:
$\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 90°, \varphi_3 = 180°$ (Fig.4).

5 Ausführungsbeispiele (Beschreibung der Figuren)

Figur 1 zeigt eine MEMS-Vorrichtung mit Vorrichtung zur Ansteuerung des Ansteuerungsschema 1. Die Vorrichtung umfasst u.a. eine Ansteuerungseinrichtung, ein geerdetes bewegliches Element und zwei feste Elektroden. Die festen Elektroden werden mit jeweils mit einer Sinusspannung angesteuert, die zueinander um 90° phasenverschoben sind.

Figur 2 zeigt eine MEMS-Vorrichtung mit Vorrichtung zur Ansteuerung des Ansteuerungsschema 2. Die Vorrichtung umfasst u.a. eine Ansteuerungseinrichtung, mindestens ein bewegliches Element und mindestens zwei feste Elektroden.

Figur 3 zeigt das erste Spannungsansteuerungsschema mit einem geerdeten beweglichen Element und mit zwei festen Elektroden, die jeweils mit zueinander um 90°-phasenverschobenen Sinusspannungen angesteuert werden.

Figur 4 zeigt eine der Anregungsspannung äquivalente Kraft auf das bewegliche Element bzw. die Auslenkungsantwort

Figur 5 zeigt das zweite Spannungsansteuerungsschema, wobei alle beweglichen und festen Elektroden mit alternierenden 90°-phasenverschobenen Spannung beaufschlagt sind

Figur 6 zeigt eine der Anregungsspannungen II äquivalente Kraft auf das bewegliche Element bzw. die Auslenkungsantwort

6 Möglicher Aufbau und Inhalt der Ansprüche

Vorrichtungsanspruch:

Elektrostatisches System, insbesondere ein MEMS-System, umfassend:

- zwei Elektrodenstrukturen (Stator)
- Finne zwischen den zwei Elektrodenstrukturen
- eine Steuervorrichtung,

dadurch gekennzeichnet, dass die Steuervorrichtung ausgebildet ist, die zwei Elektrodenstrukturen mit einer Phasendifferenz von 90° zueinander anzusteuern und die Finne GND

oder dass die Steuervorrichtung ausgebildet ist, die beiden Elektroden und das bewegliche Element mit einer alternierenden, um 0V schwingenden und äquidistant 90° phasenverschobenen Spannung anzusteuern, beispielsweise hat die erste Elektrode eine Phasenverschiebung von 0°, die zweite Elektrode eine Phasenverschiebung von 180° und das bewegliche Element von 90°.

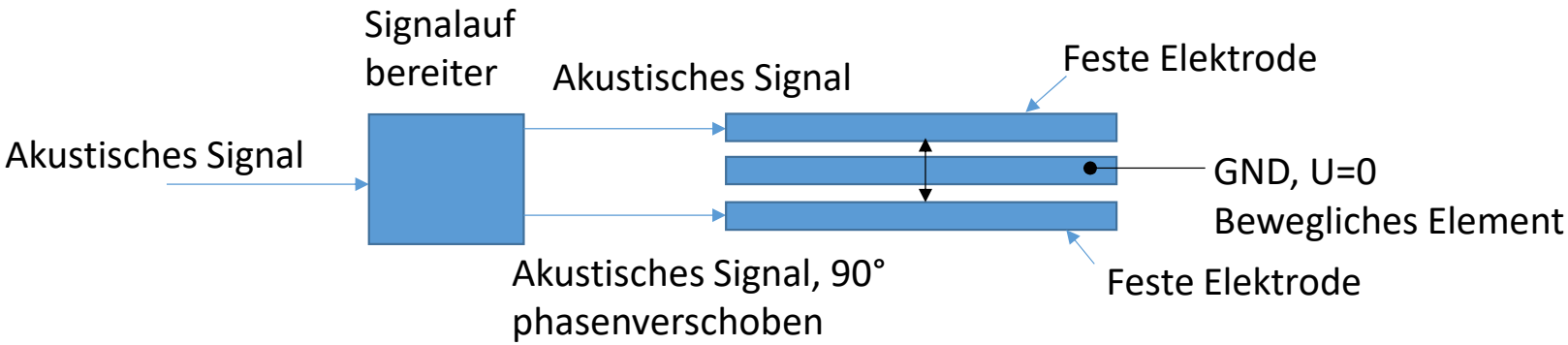

Signalauf
bereiter
Akustisches Signal
Feste Elektrode
Akustisches Signal
GND, U=0
Bewegliches Element
Akustisches Signal, 90°
phasenverschoben
Feste Elektrode

Fig.1

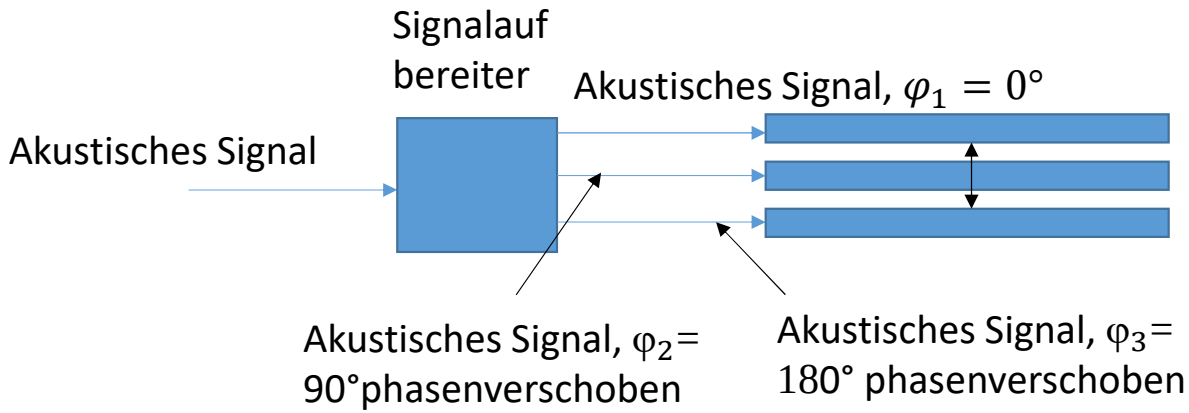

Signalauf
bereiter
Akustisches Signal, $\varphi_1 = 0°$
Akustisches Signal
Akustisches Signal, φ_2= 90°phasenverschoben
Akustisches Signal, φ_3= 180° phasenverschoben

Fig.2

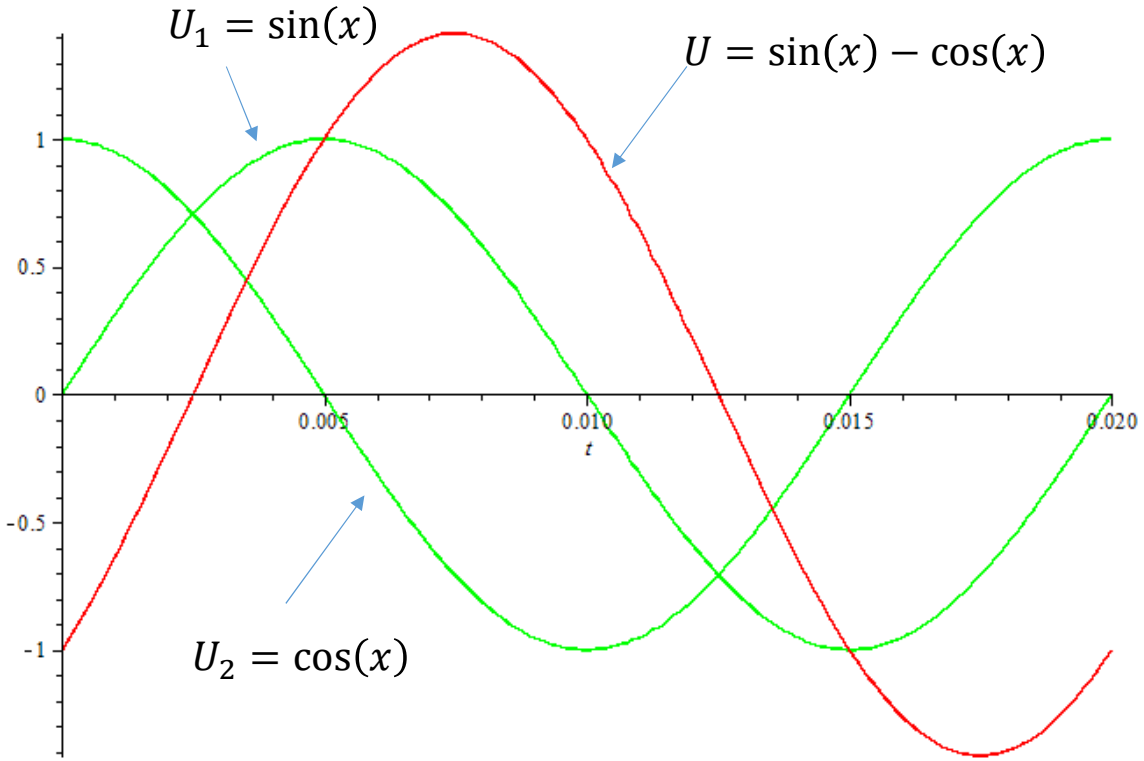
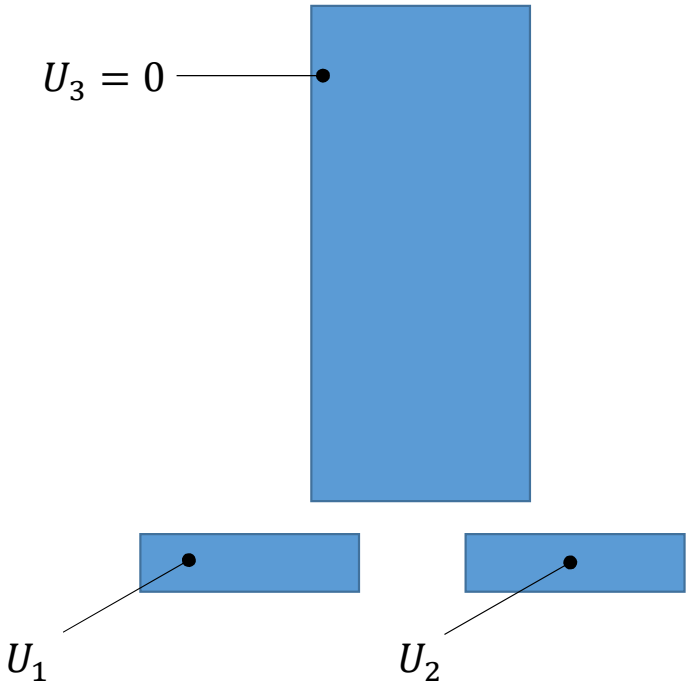
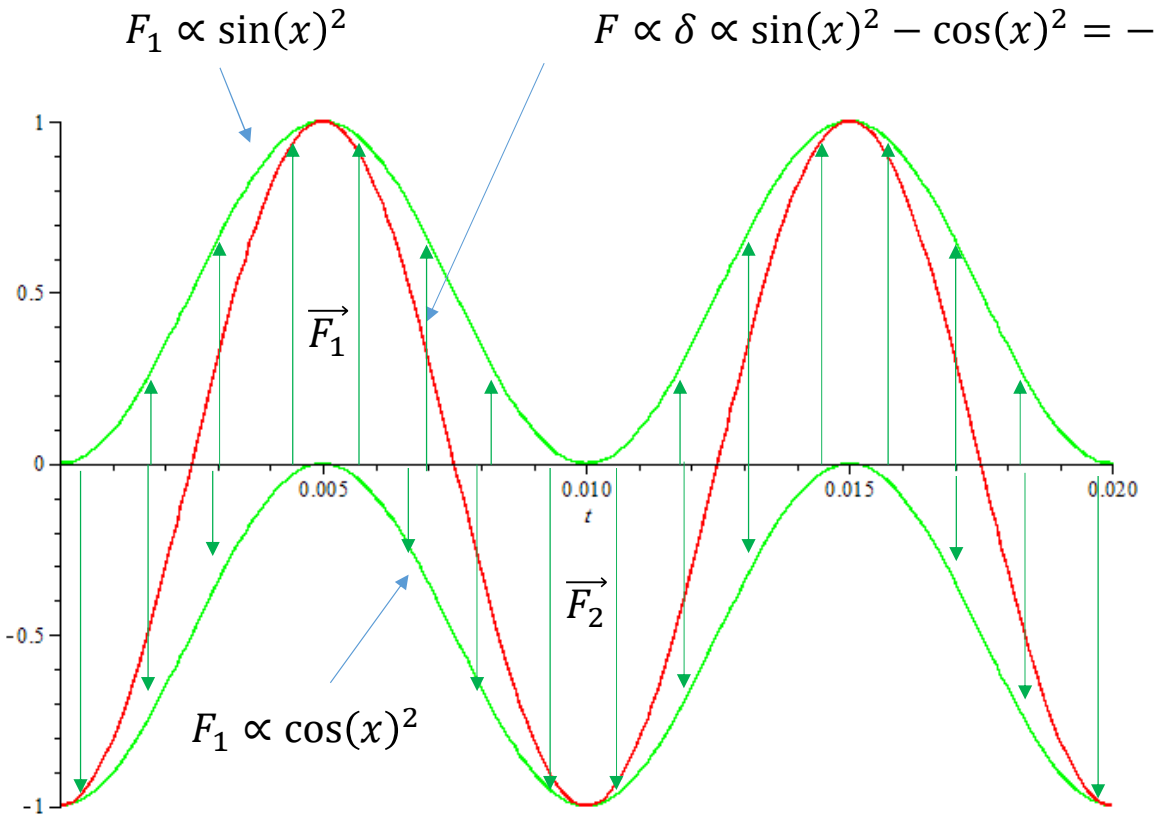

$U_1 = \sin(x)$
$U = \sin(x) - \cos(x)$
$U_2 = \cos(x)$
1
0.5
0
-0.5
-1
0.005
0.010
0.015
0.020
t

Fig.3


$U_3 = 0$
U_1
U_2


$F_1 \propto \sin(x)^2$
$F \propto \delta \propto \sin(x)^2 - \cos(x)^2 = -\cos(2x)$
1
0.5
0
-0.5
-1
0.005
0.010
0.015
0.020
t
$\overrightarrow{F_1}$
$\overrightarrow{F_2}$
$F_1 \propto \cos(x)^2$

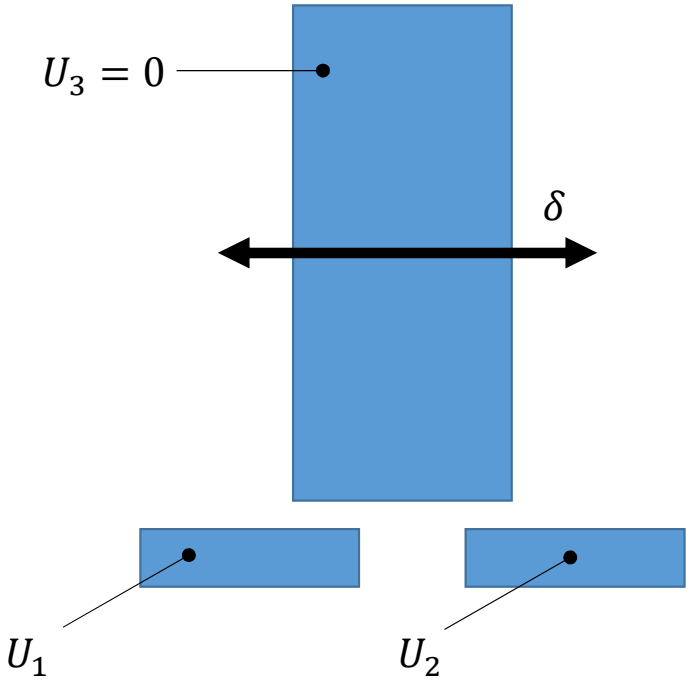
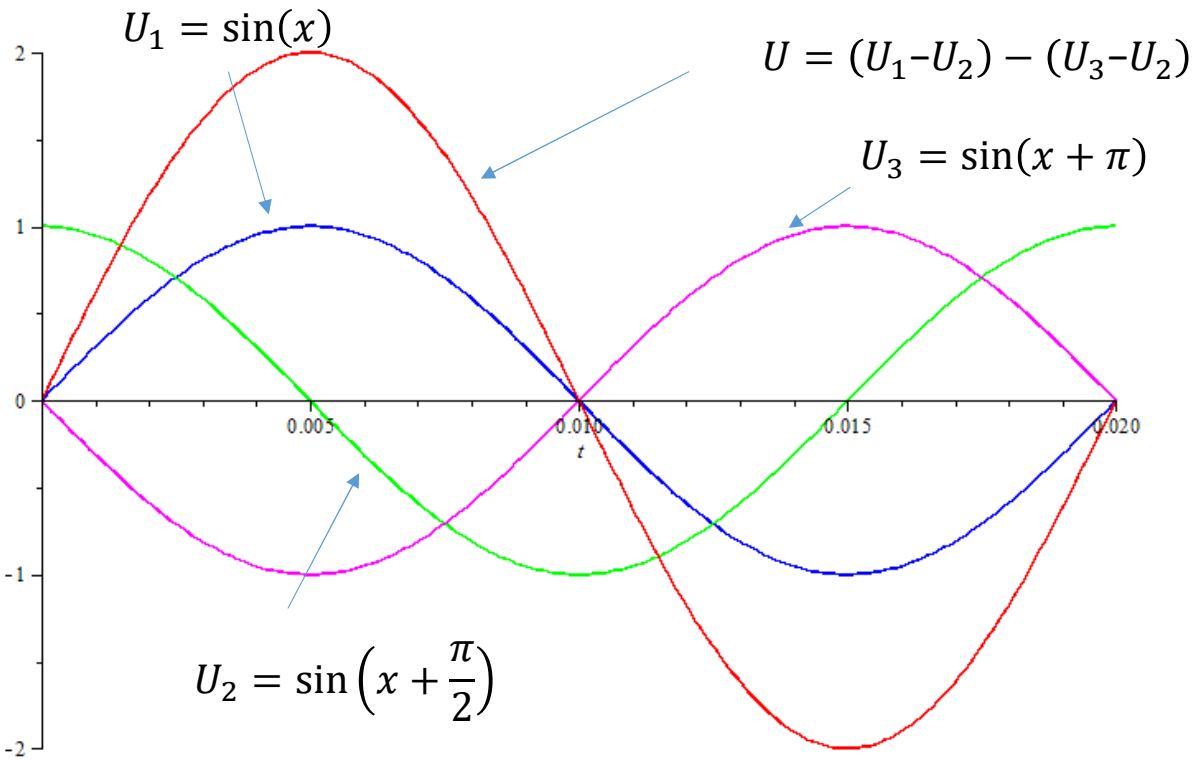

$U_3 = 0$
δ
U_1
U_2

Fig.4


$U_1 = \sin(x)$
$U = (U_1 - U_2) - (U_3 - U_2)$
$U_3 = \sin(x + \pi)$
$U_2 = \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right)$
2
1
0
-1
-2
0.005
0.010
0.015
0.020
t

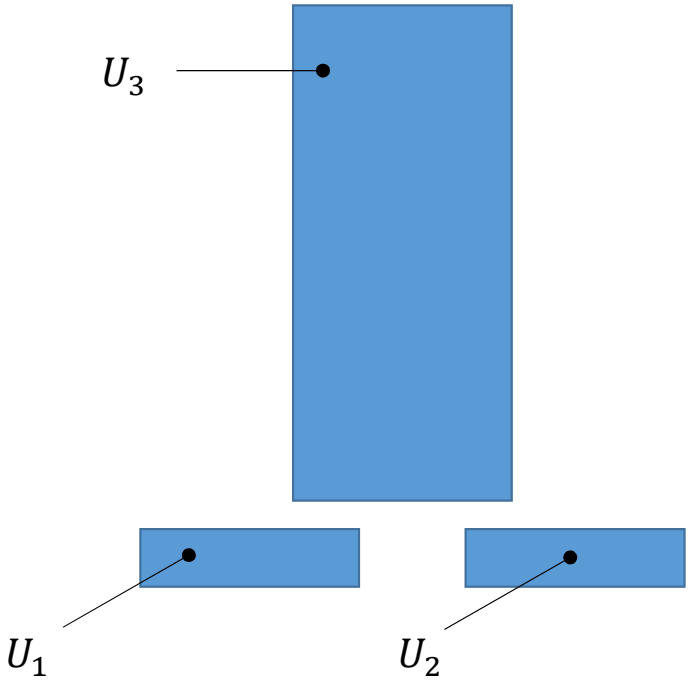

U_3
U_1
U_2

Fig.5

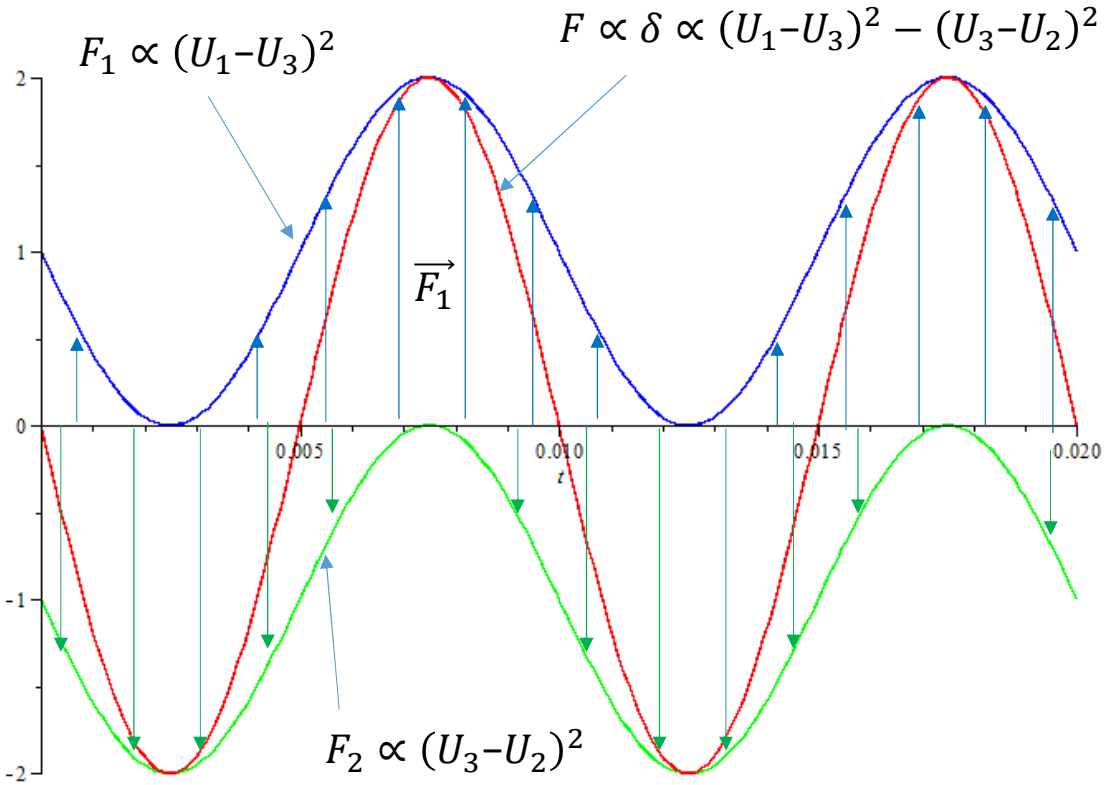
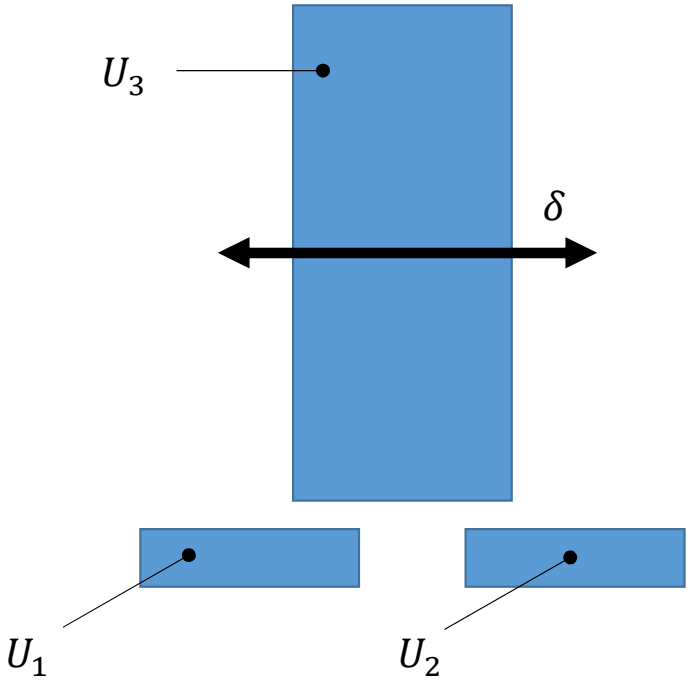

$F_1 \propto (U_1-U_3)^2$
$F \propto \delta \propto (U_1-U_3)^2 - (U_3-U_2)^2$
$\overrightarrow{F_1}$
$F_2 \propto (U_3-U_2)^2$
2
1
0
-1
-2
0.005
0.010
0.015
0.020
t

Fig.6


U_3
δ
U_1
U_2